

# 飞机天线间兼容性分析及工程应用

Antenna – to – Antenna EMC Analysis and Engineering Application of Aircraft

海军电磁兼容研究检测中心 汤仕平 杨景发

**摘要** 文章以天线间耦合为重点,提出飞机天线间射频兼容性分析原理和方法,介绍了工程中的应用过程、结果分析、电磁干扰控制措施并提出建议。

**关键词** 电磁兼容性 天线 飞机 应用

**Abstract** This paper puts forward the principle and method of antenna – to – antenna RF compatibility analysis of the aircraft with emphasis on the antenna coupling. Meanwhile, the authors introduce the application process and analysis of results and EMI control measures and proposals in the engineering.

**Keywords** electromagnetic compatibility (EMC), antenna, aircraft, application

飞机作为一个指挥控制单元,安装有许多复杂且高级的航空电子电气设备,频谱覆盖范围从甚低频(VLF)到超高频(UHF),在大功率高频(HF)和超高频(UHF)设备产生并通过天线辐射的电磁环境中,保证机载设备兼容是相当重要而复杂的问题。在飞机系统的研制、生产和安装过程中有必要研究其变化后的电磁环境,对其兼容性状态进行分析。

EMC 预测分析的目标是评估全机的电磁兼容性状态,分析是否存在电磁干扰,以便于总体采取措施排除,尽量减少干扰问题的出现,确定关键性区域和关键性设备,确定干扰测试的重点,并为今后系统及设备设计和系统使用提供数据。

天线辐射的电磁能量是造成电磁环境恶劣的主要因素,天线耦合是造成电磁干扰问题的主要耦合途径。因此在工程研制过程中,应以天线之间射频兼容性分析为重点,开展全机电磁兼容性预测的研究工作。

## 1. 预测分析原理

### 1.1 基本分析法

无论是复杂的还是简单的电子系统,从电磁干扰预测的角度考虑,都可归结为干扰源(发射器)、传输函数(耦合路径)和敏感设备(接受器)三个基本要素。电磁干扰预测的基本思想是用数学定量关系式表达上述三要素,即根据理论和试验建立它们的数学模型。然后将其干扰源模型、传输函数模型和敏感设备模型按一定要求组合后,利用一定手段(如计算机软件)模拟特定的电磁环境,并获得各种潜在电磁干扰的计算结果,从而判断干扰源发射的电磁能量是否会影响敏感设备,系统能否兼容工作。

### 1.2 干扰预测方程

衡量单个干扰发射器和单个干扰接受器之间的潜在干扰程度,可通过将接受器输入端的有效干扰功率值与敏感度门限值相比较来确定。

在敏感设备处的有效干扰功率  $Pr$  为:

$$Pr(f, t, d, p) = Pt(f, t) + Ctr(f, t, d, p) \quad (1)$$

式中  $Pr(f, t, d, p)$  ——是干扰源耦合至敏感设备处的干扰功率,是频率( $f$ )、时间( $t$ )、间距( $d$ )、收发天线的相对方向( $p$ )的函数,单位为 dBm;

$Pt(f, t)$  —干扰源发射的干扰功率,单位为 dBm;

$Ctr(f, t, d, p)$  —干扰源和敏感设备之间的功率传输函数,单位为 dB。

潜在干扰问题的严重程度可由敏感设备处的有效干扰与敏感度门限值之差来表示,此差称为电磁干扰安全余量( $IM$ ),即:

$$IM(f, t, d, p) = Pr(f, t, d, p) - Ps(f, t) \quad (2)$$

式中:  $IM(f, t, d, p)$  —干扰源和敏感设备对的电磁干扰安全系数(dB);

$Pr(f, t, d, p)$  —敏感设备处接收到的干扰信号输入功率(dBm);

$Ps(f, t)$  —敏感设备的敏感度门限电平(dBm)。

对于接收机来说,  $Ps$  即为灵敏度。如果将  $Pr$  与  $Ps$  的表达式展开,且收发频率有一间隔  $\Delta f$  时,则有:

$$IM(f, t, d, p) = Pt(f, t) + Gt(f, t, d, p) - L(f, t, d, p) + Gr(f, t, d, p) - Pr(f, t) + GF(Bt, Br, \Delta f) \quad (3)$$

式中,  $Pt(f, t)$  —在发射频率  $f$  时的发射功率(dBm);

$Gt(f, t, d, p)$  —发射天线在发射频率  $f$  时在接收天线方向的增益(dB);

$L(f, t, d, p)$  —收发天线间在频率  $f$  时的传输损耗(dB);

$Gr(f, t, d, p)$  —在发射天线方向,在频率  $f$  时的接收天线增益(dB);

$Pr(f, t)$  —在响应频率  $f$  时接收机敏感度门限电平(dBm);

$GF(Bt, Br, \Delta f)$  —计入发射机和接收机带宽  $Bt, Br$  及发射与响应之间的频率间隔  $\Delta f$  的系数(dB)。

如果安全余量  $IM$  为正, 表明存在潜在干扰; 反之, 安全系数  $IM$  为负, 则表示几乎不可能产生干扰, 设备能兼容工作; 安全系数  $IM = 0$ , 则表示处于临界状态。对于大型复杂系统, 如果所有设备或端口之间都兼容, 则系统总体兼容。

电磁干扰安全余量的规定值一般根据总体要求确定。

## 2. 预测分析方法

通过设备的工作频率分布、使用限制以及天线隔离度估算, 进行初步分析, 确定有可能产生干扰的发射设备和接收设备对。在此基础上, 应用计算机分析技术, 建立数学模型, 计算耦合对的天线隔离度和 EMI 安全余量, 进而详细分析干扰情况。

### 2.1 电磁频谱

初步分析通常采用一些原则和经验, 结合手工计算进行。对于天线之间的射频兼容性, 由设备的频谱分布, 确定需要的天线隔离度, 并通过初步估算得出天线隔离度, 分析发射源和接收器之间是否存在干扰以及干扰程度, 并根据使用要求, 看这种可能性是否存在。可以利用一个很简单但非常有用的工具——发射机功率输出和接收机选择性特性表见图 1。通过这种简单图表, 确定在特定的发射和接收设备之间的隔离度要求。同时, 结合隔离度的估算, 进行需要的天线隔离度和空间隔离度的比较, 分析是否构成潜在干扰。这种图表尤其对基波和谐波的频率重合干扰分析非常有效。

### 2.2 计算机分析技术

计算机分析技术是应用计算机程序, 分析特定的干扰耦合途径下设备干扰情况。对于天线之间的射频兼容性, 应用程序的用途是确定可能在设备的特殊工作范围内发生的同频干扰和谐波干扰以及杂波干扰。根据发射设备和接收设备的性能计算天线隔离度, 确定设备之间的 EMI 干扰电平和 EMI 安全余量。

分析程序中, 建立一个机身的三维数学模型, 用来确定天线位置和计算两个特定设备之间的天线隔离度。天线隔离度的计算分为三个部分: 自由空间、机翼遮挡和机身弯曲。根据发射设备和接收设备特性计算所需频率和信号输入、输出电平。程序的输出值为 EMI 安全余量和设备之间的天线隔离度。

### 3. 分析过程

#### 3.1 初步分析

根据各设备的工作频率, 绘出发射机输出功率和接收机灵敏度与频率的对应关系, 见图 1 所示。可以很简明地看出所有有关设备的工作频谱覆盖范围。根据图表可以确定, 对于发射机和接收机工作频率对应时的隔离度要求。

天线-天线 EMC 性能的提高需要通过增加天线空间隔离度、优化天线布置、减少接口和敏感设备之间的相互影响来实现。保持足够的天线隔离度, 可以减少接收设备通过天线耦合的电磁能量, 从而达到兼容性。但由于飞机尺寸限制,

由增加空间隔离度而导致天线隔离度的增加是有限的。通过隔离度计算可以反映这种限制的程度, 同时可以反映受干扰的可能性。

机身顶部到顶部或机身底部到底部安装天线的隔离度, 可以近似采用自由空间传播的耦合模型和计算公式。如果自由空间中有一各向同性天线辐射信号, 在增益  $G=1$  的无损耗各向同性接收天线端接收的有效功率为:

$$Pr = Pt\lambda^2/(4\pi d)^2 \quad (4)$$

对于直接频率重合和谐波频率重合, 为避免干扰至少应需要的天线隔离度: 如图 1 中举例所示, A、B 两设备之间需要 145dB 的天线隔离度; C、D 两设备之间需要 85dB 的天线隔离度。

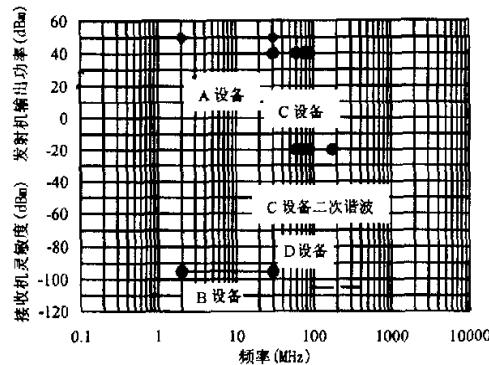


图 1 发射机输出功率和接收机灵敏度与频率的对应关系

隔离度。根据上面给出的天线隔离度公式的估算, 看需要的隔离度是否能得到满足。实际上, 由于空间有限, 有可能存在干扰, 尤其是基波和谐波的频率重合所造成的潜在干扰。下一步将以此为重点进行分析。

### 3.2 计算机分析

#### 3.2.1 分析算法

一般可分为: 列出干扰源端口及其技术参数; 列出敏感端口及其技术参数; 列出从各源端口到敏感端口的耦合路径的传输函数  $T(f)$ 。分析程序将飞机上所有非预期耦合端口分成源端口阵列和敏感端口阵列, 其间标有耦合路径。每个端口均用需要频谱和非需要频谱表示, 计算每个敏感端口接收到的干扰功率, 与其敏感度比较, 求得电磁干扰安全余量  $IM$ , 按规定的安全余量评定飞机系统各端口对之间的电磁兼容状况。

#### 3.2.1.1 天线间功率传输比

计算的天线间功率传输比  $T(f)$  可用下式表示:

$$T(f) = Gt + Gr + TFS(f) + SFC(f) + SFW(f) + YLK(f) + TAR(f) + RAR(f) + TFX(f) + TFR(f) + P_t \quad (5)$$

式中:

$Gt$ —发射天线在工作频段上的增益;

$Gr$ —接收天线在工作频段上的增益;

TFS(f) 一从发射天线至接收天线在频率 f 上的自由空间路径损耗；

SFC(f) 一机身遮蔽因子；

SFW(f) 一机翼遮蔽因子；

YLK(f) 一隔框遮蔽因子；

TAR(f) 一偶极子发射天线增益修正因子；

RAR(f) 一偶极子接收天线增益修正因子；

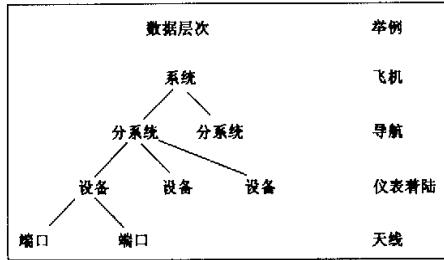
TFX(f) 一发射机天线端滤波器衰减；

TFR(f) 一接收机天线端滤波器衰减；

PL 一极化修正因子。

### 3.2.1.2 数据结构

典型的系统一般均包含大量干扰源和敏感设备，为便于数据收集和利用，在分析程序中采用层次型数据结构，见图 2 所示。系统被分成若干分系统，每个分系统又有几个设备组成。电磁干扰能量可以由端口输入或从端口输出。由于计算的是天线间兼容性，这里端口指天线。



### 3.2.2 分析流程

(1) 工程建模。建立各级数据模型，包括系统建模和分系统、设备、端口建模。

a. 系统建模包括飞机结构（机身、机翼）、天线、滤波器。

b. 分系统设备和端口建模包括分系统设备和端口划分、设备频谱表、天线位置和波束指向。

为简化计算，采用的飞机结构模型是用圆锥体和圆柱体模拟机身，两块金属板模拟机翼。按照实际的飞机结构尺寸建立的飞机结构模型应尽量接近程序要求。因为飞机结构直接影响到天线之间的功率传输损耗。

(2) 模型数据输入。采集数据，将原始参数变换为模型需要的数据，输入数据。

(3) 运行分析程序。计算传输比、计算 EMI 安全余量。

(4) 分析结果。根据测算得出的结果进行分析。

(5) 采取相应的干扰控制措施。

### 4. 结果分析

根据上述分析结果，可列出一个 EMC 矩阵表。这个表的纵列是对干扰敏感的设备项目，横列是产生电磁干扰（源）的

设备项目，在纵横交汇点上填入可能造成潜在干扰的等级：严重、轻微与基本不干扰。

其干扰模式一般有同频干扰、谐波干扰、邻近频道干扰、杂波干扰和互调干扰。但主要的干扰模式是谐波干扰、邻近频道干扰和互调干扰（同频干扰的程度最严重，但一般在选取工作频率时会错开）。

造成 EMI 安全余量不合格的原因可归纳为下面几种：

(1) 有些天线之间的间距太小。

(2) 工作频率间隔太小。此类问题主要发生在：

a. 由于工作频率间隔太小，发射功率落入接收机射频通带内。

b. 当其中一个设备发射，另一设备在同一频段上接收时，由于接收设备输入端对发射设备发射能量的衰减只高于对有用信号的衰减 80dB，使一部分发射能量进入接收机射频通带内，从而引起干扰。

(3) 工作频率构成谐波对。此类问题主要发生在 VHF/UHF 通信设备之间。一般来讲，发射机杂波抑制能力远高于二次、三次谐波抑制能力。

解决的途径和措施一般有：

(1) 机载设备应满足 GJB151A（或 MIL-STD-461D）要求。带有天线的发射和接收设备还应满足 CE106 和 CS104 等项指标要求。

(2) 同时工作的发射机和接收机工作在不同频率点上。为排除接收机附加响应和发射机附加输出的影响，发射机和接收机的工作频率之间必须保持一定的距离，以便借助设备的选择性获得隔离效果。

(3) 发射机基波或谐波频率必须避开固定的接收机频率。

(4) 位于机身同侧的 VHF/UHF 通信设备之间的工作频率间隔大于下述值：

$$VHF: 5f_{RF} + 0.5B_{RF};$$

$$UHF: 2.5f_{RF} + 0.5B_{RF}.$$

(5) VHF/UHF 发射机之间的三次和五次互调产物不能与所分配的接收机工作频率相重合。

(6) 位于机身同侧的 VHF/UHF 通信设备之间避免构成二次、三次谐波发射和接收对。发射机谐波频点和接收机工作频点之间的频率间隔大于下述值：

$$B_{RF}/2 \times n + (0.5B_{RF}, 2.5f_{RF})_{min} \quad (6)$$

式中： $B_{RF}$  = 发射机发射带宽；

n = 谐波次数；

$B_{RF}$  = 接收机射频带宽；

$f_{RF}$  = 接收机接收频率。

### 5. 综述

在进行初步分析的基础上，采用计算机技术分析天线与

(下转 19 页)

上。由于电压高、电流大,碳纤维束快速升温,当温度升至360℃以上时,多数基体树脂开始热分解,使纤维失去基体的支持,整个复合材料体系的强度、刚度就大幅度下降,最后导致结构破坏。对于HMG-50和HMS两种纤维束,当温度升到300℃时,对应纤维束中的电流分别为105A和700A。对单向复合材料板经放电试验后观察:HMG-50在电流密度为 $20.4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 放电后,出现了烧蚀和分层;HMS在电流密度为 $25 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 放电后,也出现了烧蚀和分层,当电流密度高达 $52 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时,除见到燃烧外,还见到片状剥落。

无防护涂层的碳纤维复合材料是不能用于直接雷击区和扫掠雷击区,它在25kA的峰值电流和0.24库仑电量的作用下就会出现轻微损伤,在60~100kA的峰值电流和1.9库仑电量的作用下会出现严重损伤,对于蜂窝夹层结构,在I=50kA的中等放电下,夹层结构因闭室内空气膨胀而造成蜂窝芯破裂、面板与芯子脱开。

### 6.3 防护措施

雷电会对飞机造成极大的危害,飞机上的雷电防护措施十分重要。在直接雷击区,雷击导电通道应有能力传输200kA的峰值电流并且在1~2s内有传输200库仑电量的能力。在扫掠雷击区,雷击导电通道应有能力传输100kA的峰值电流而无高热和起火现象。雷电感应电压主要由于雷电电流流过机身和机体蒙皮阻抗产生快变化磁场引起的,通过屏蔽技术、接地技术的应用,可以减小感应电压。雷电电流可能进入飞机及可能流经的各处,均应采取雷电防护措施。例如航行灯、闪光灯、燃油加油口盖、油量表口盖、加油套管、油箱通气管、天线、雷达天线罩、座舱盖、全静压管、翼尖和翼尾、油箱挂架、武器及其挂架、升降舵、方向舵、副翼、襟翼等。

用在直接雷击区的复合材料,外表面必须喷涂0.15mm厚的铝膜,或者用98g/m<sup>2</sup>的铝丝网与复合材料一次成形。用在扫掠雷击区的复合材料,外表面必须喷涂0.10mm厚的铝

膜,或者用49g/m<sup>2</sup>的铝丝网与复合材料一次成形。试验证明,采取上述措施的复合材料具有良好的雷电防护能力。

复合材料整体油箱,应安置在遭受雷击概率较小的区域。若采用铝丝网作为防护措施,在遭雷击时,为防止铝丝网上电荷传入复合材料内部,在铝丝网和复合材料之间应加一层玻璃布,这层布也能防止两种不同材料之间的电化学腐蚀。铝丝网在复合材料油箱蒙皮周边与飞机的雷击电流传输通路应有可靠的电连接。复合材料油箱蒙皮和骨架之间的紧固件要用钛合金,为防止紧固件处产生电火花并把电荷传入复合材料内部,在铝丝网上开孔时,孔的直径要比紧固件大几毫米,靠基体绝缘强度阻止铝丝网上的电流到达紧固件。也可以在紧固件安装完后,在油箱外表面的紧固件头部用数层浸渍环氧的玻璃布覆盖并局部加热固化,以防止雷击电弧与紧固件头部接触。铝丝网与导体应用机械连接,并在接缝处涂密封胶,防止进水引起腐蚀。

如果在油箱蒙皮外表面喷涂铝箔条作为防护措施,那么铝箔窄条的宽度应为25mm、厚度为0.10mm,沿顺气流方向等间距50mm布置,箔条长度方向为翼面的展向。因为雷击初始附着点一般在机翼的前缘,雷电附着点受飞机运动影响不断向气流下方跳跃式再接触,雷击放电的等离子气体导电通道受气流影响左右偏离不大。所以当箔条纵向沿气流方向布置时,一旦雷击初始附着点在两箔条之间,就可能使扫掠过程中的雷电附着点不再与箔条接触,这样就起不到防雷作用。

### 7. 结束语

综上所述,由于复合材料对接地系统的影响比较明显,因此不能把金属飞机上采用的接地回路技术不加改进地直接用到复合材料结构上。内部结构仍然采用铝合金的复合材料飞机,可以提供连续的接地通路,不具有低阻抗导电性的复合材料结构件不可作为电流回路组成部分。

(上接11页)

天线之间兼容性。计算过程中,建立飞机的数学模型,包括飞机结构模型、天线模型、滤波器模型等,用作天线-天线空间隔离度计算机计算的数据输入,计算中考虑自由空间、机翼遮挡和机身弯曲等诸多因素的影响。通过使用计算机运行获得的天线隔离度和电磁干扰(EMI)裕量,分析、评估各种潜在干扰模式的电磁兼容性。

通过天线-天线EMC分析,可以看出机上是否存在有天线之间干扰问题。根据分析结果,提出干扰控制措施和频率管理准则,通过合理使用,有效达到兼容性。

一般情况下,预测的结果比较保守,这主要是由于建立模型时是以最坏情况考虑,安全余量比较大。影响预测准确度的因素主要有建模的合理性、数值计算方法的选择、输入

数据的准确性等。

### 参考文献

1. William L. Dillon, Antenna - to - Antenna EMC Analysis of the E - 4A Advanced Airborne Command Post, 1974 IEEE Electromagnetic Compatibility symposium Record, San Francisco, California, July 16 - 18, 1974, pp215 ~ 231.
2. J. B. Bogdanor, et al. IntraSystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program. McDonnell Aircraft Co. RADC - TR - 74 - 342. Dec 74.
3. AFSC DH 1 - 4 电磁兼容性设计手册,陈穷等译,航空工业部,1988。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>